

## Теплові та газодинамічні процеси в складних вихрових і закручених потоках

## Тепловые и газодинамические процессы в сложных вихревых и закрученных потоках

## The thermal and gas-dynamic processes in complex vortex and swirling flows

1. **Номер державної реєстрації теми 0113U002467, № реєстрації в університеті 2610-ф**

2. **Науковий керівник** – д.т.н., проф., академік НАНУ Халатов А.А., Халатов А.А., Khalatov Artem A.

3. **Суть розробки, основні результати.**  
(укр.)

Експериментально і теоретично досліджено теплообмін і газодинаміку двох типів складних вихрових і закручених потоків. У циліндровому каналі з тангенціально-похилим закручуванням потоку на вході для стаціонарних умов і при радіальному обертанні каналу встановлено нові закономірності локального і середнього теплообміну, отримано рівняння подібності для різних граничних умов на виході. Визначено модель турбулентності, що адекватно описує теплові і газодинамічні процеси, вивчено вплив сили Коріоліса на теплообмін в циліндровому каналі, що радіально обертається, із закручуванням потоку. Розроблено методику розрахунку характеристик теплообміну і газодинаміки. Вивчено метод керування теплообміном за довжиною каналу з тангенціально-похилим закручуванням потоку.

Встановлено нові закономірності теплообміну і газодинаміки біля плоскої пластини за умов подачі вторинного потоку в одно- і дворядну систему дискретних напівсферичних заглиблень та в парні отвори на вході. Отримано нові дані, що характеризують теплову ефективність плоскої поверхні при обтіканні потоком з підвищеною турбулентністю і прискоренням. Наведено базові рівняння подібності для ефективності теплообміну і поправочні функції до нього, що враховують вплив зовнішньої турбулентності і прискорення потоку, визначено поперечну нерівномірність теплообміну. Обґрунтовано моделі турбулентності, які адекватно описують теплообмін і газодинаміку, виявлено фізичні особливості, що визначають ефективність теплообміну в досліджених умовах. Сформульовано пропозиції до методик розрахунку ефективності плівкового охолодження.

(рос.)

Экспериментально и теоретически исследованы теплообмен и газодинамика двух типов сложных вихревых и закрученных потоков. В цилиндрическом канале с тангенциально-наклонной закруткой потока на входе для стационарных условий и при радиальном вращении канала установлены новые закономерности локального и среднего теплообмена, получены уравнения подобия для различных граничных условий на выходе. Определена модель турбулентности, адекватно описывающая тепловые и газодинамические процессы, изучено влияние силы Кориолиса на теплообмен в радиально вращающемся цилиндрическом канале с закруткой потока. Разработана методика расчета характеристик теплообмена и газодинамики. Изучен метод управления теплообменом по длине канала с тангенциально-наклонной закруткой потока.

Установлены новые закономерности теплообмена и газодинамики около плоской пластины при подаче вторичного потока в одно- и двухрядную систему дискретных полусферических углублений и в парные отверстия на входе. Получены новые данные, характеризующие тепловую эффективность плоской поверхности при обтекании потоком с повышенной турбулентностью и ускорением. Представлены базовые уравнения подобия для эффективности теплообмена и поправочные функции к нему, учитывающие влияние внешней турбулентности и ускорения потока, определена поперечная неравномерность теплообмена. Обоснованы модели турбулентности, адекватно описывающие теплообмен и

газодинамику, виявлені фізическі особеності, определяючі ефективність теплообміна в изученных условиях. Сформулированы предложения к методикам расчета эффективности пленочного охлаждения.

(англ.)

Using the experimental and theoretical approach both heat transfer and gas-dynamics of two complex vortex and swirling flows have been studied in details. New regularities regarding the local and average heat transfer have been established in the cylindrical channel with initial tangentially-inclined flow swirl at the stationary conditions, as well as in the radial rotating channel. The new similarity correlations have been obtained for the different boundary conditions arranged at the channel exit. The turbulence model has been determined, describing adequately both the thermal and gas-dynamic parameters, the Coriolis force influence on heat transfer in the radial rotating cylindrical channel with flow swirl has been studied. The heat transfer and gas-dynamic calculation procedure has been developed. The novel approach has been studied of the heat transfer control along the channel axial length with tangentially-inclined flow swirl.

New heat transfer and gas-dynamic regularities over the flat plate at the secondary flow supply into single- and dual rows of discrete hemispherical dimples and twin holes at the inlet have been established. New scientific results characterizing the thermal effectiveness of the flat plate have been obtained at the external turbulence and flow acceleration conditions. The basic similarity correlations are given for the heat transfer effectiveness, as well as for correction functions, characterizing effect of external turbulence and flow acceleration; the span-wise heat transfer non-uniformity has been identified. The turbulence models describing adequately heat transfer and gas-dynamic have been justified, the physical features defining heat transfer effectiveness have been revealed for the conditions studied. The suggestions are given for the calculation procedures on the heat transfer effectiveness.

**4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**  
Немає.

**5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Результати дослідження теплообміну і газодинаміки в циліндричному каналі з тангенціально-похилим закручуванням потоку не мають аналогів в світі. Результати щодо теплообміну і газодинаміки при подачі вторинного потоку в систему дискретних напівсферичних заглиблень і в парні отвори не мають світових аналогів в частині даних по впливу зовнішньої турбулентності та прискорення потоку.

**6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Використання отриманих результатів при розробці нових схем внутрішнього і зовнішнього охолодження лопаток замість традиційних схем, дозволить збільшити коефіцієнт корисної дії високотемпературних газових турбін на 3...4%.

*При внутрішньому охолодженні* області передньої кромки лопатки закрученим потоком:

– за рахунок зниження на 3...6% необхідної витрати охолоджувача при заданій температурі газу перед турбіною;

– за рахунок підвищення на 40...60°C температури газу перед турбіною при тій самій витраті охолоджувача.

*При зовнішньому охолодженні* поверхонь тиску і розрідження лопатки за рахунок подачі охолоджувача в напівсферичні заглиблення або парні отвори (плівкове охолодження):

– за рахунок зниження на 4...6% витрати охолоджувача при заданій температурі газу перед турбіною;

– за рахунок підвищення на 60...80°C температури газу перед турбіною при тій самій витраті охолоджувача.

За рахунок простішої технології виготовлення отворів для подачі охолоджувача при тому ж ефекті охолодження буде досягнуто зниження на 20...30% витрат на виготовлення лопаток газових турбін у порівнянні з усіма іншими інноваційними технологіями охолодження.

#### **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).**

Результати роботи можуть бути використані в проектних організаціях, які займаються розробкою, створенням і випробуванням високотемпературних газотурбінних двигунів і установок, а також високотемпературних установок різноманітного призначення.

#### **8. Стан готовності розробки.**

Отримані дані можуть бути використані при розрахунку систем внутрішнього і зовнішнього охолодження лопаток високотемпературних газових турбін з використанням принципу закручування потоку при внутрішньому охолодженні області передньої кромки лопатки, а також при подачі охолоджувача в заглиблення напівсферичної форми або в парні отвори при зовнішньому охолодженні поверхонь тиску і розрідження лопатки.

#### **9. Існуючі результати впровадження.**

Результати роботи знайшли застосування в Інституті технічної теплофізики НАН України (акт впровадження від 16.01.2015) при розробці методики розрахунку ефективності плівкового охолодження соплових лопаток високотемпературних ГТД на користь Державного підприємства «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв), (акт впровадження від 15.11.2013 р.), а також в учбовому процесі Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ» (акт впровадження від 27.01.2015 р.).

#### **10. Форма участі інвестора (яка краща форма участі в реалізації результатів проекту інвестора: частка в проекті %, частка від прибутку %, інше)**

Створення і промислове випробування дослідного варіанту лопатки з циклонним охолодженням передньої кромки (принцип закручування потоку) – 70%. Створення і промислове випробування дослідного варіанту лопаток з подачею охолоджувача в напівсферичні заглиблення і парні отвори – 70%.

#### **11. Обсяг інвестицій (необхідна для результатів проекту сума інвестицій у доларах США).**

- Створення і промислове випробування дослідного варіанту лопатки з циклонним охолодженням передньої кромки (принцип закручування потоку) – \$205 000.
- Створення і промислове випробування дослідного варіанту лопаток з подачею охолоджувача в напівсферичні заглиблення і парні отвори – \$400 000.

#### **12. Мета інвестицій (розширення бізнесу, створення нового підприємства, інше).**

Створення і випробування 3-х варіантів лопаток газових турбін з інноваційними схемами внутрішнього і зовнішнього охолодження.

### 13. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ "КПІ", Фізико-технічний інститут, Кафедра фізики енергетичних систем,  
204-90-57, [phes@pti.kpi.ua](mailto:phes@pti.kpi.ua)

### 14. Фото розробки Немає.

### 15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

(2 монографії, 1 посібник, 23 наукові статті, 1 дисертація, 21 тези доповідей).

#### Монографії

1. Научные и прикладные вопросы промышленного газотурбостроения – редактор и составитель Халатов А.А. / Изд ФЭД. – Харьков.– 2014.– том 1. – 378 с.
2. Научные и прикладные вопросы промышленного газотурбостроения – редактор и составитель Халатов А.А. / Изд ФЭД. – Харьков.– 2014.– том 2. – 383 с.

#### Статті

3. Халатов А.А. Адаптация k-ε модели турбулентности при моделировании пленочного охлаждения плоской пластины при вдуве через один ряд отверстий в сферических углублениях / А.А. Халатов, М.В. Безлюдная, Ю.Я. Дашевский и др.// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. — 2013. — № 12(986).— С. 55–62. (фахове видання України, *Ulrich's Periodicals Directory*), ISSN 2078-774X.
4. Халатов А.А. Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий в кратерах при ускорении внешнего потока / А.А. Халатов, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский и др.// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — Т. 63, № 3/12. — 2013. — С. 54–57. (фахове видання України, *Ulrich's Periodicals Directory*, *Index Copernicus*), ISSN 1729-3774.
5. Khalatov A.A. Flat plate film cooling from a single row inclined holes embedded in a trench: effect of external turbulence and flow acceleration / A.A. Khalatov, I.I. Borisov, Yu. Dashevsky et al // Thermophysics and Aeromechanics, —2013, — Vol. 20, No. 6. — pp.713-719. (*SCOPUS*, *Web of Science*), ISSN 0869-8643.
6. Khalatov A.A. Flat plate film cooling from a double jet holes: influence of free-stream turbulence and flow acceleration/ A.A. Khalatov, I.I. Borisov, N.A. Panchenko et al. // Thermophysics and Aeromechanics, —2014, —Vol. 21, No. 5. —pp.545-552. (*SCOPUS*, *Web of Science*), ISSN 0869-8643.
7. Халатов А.А. Неравномерность двухструйного пленочного охлаждения / А.А. Халатов, Н.А. Панченко, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский // Авиационно-космическая техника и технология. — 2014. — №8/115. — С. 94-99. (фахове видання України, *Ulrich's Periodicals Directory*, *Index Copernicus*, *Scholar*), ISSN 1727-7337.
8. Пахомов М.А. Тепловая эффективность пристенной газовой завесы при ее вдуве через круглые отверстия в траншее / М.А. Пахомов, В.И. Терехов, А.А. Халатов, И.И. Борисов // Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т.22, №.3 – С.343–352. (Видання Російської Федерації, *РИНЦ*), ISSN 0869-8635.
9. Халатов А.А. Пленочное охлаждение с помощью однорядных систем наклонных отверстий в углублениях / А.А. Халатов, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский и др.// Доповіді Національної академії наук України. - 2015.- №6.- С.74–82.
10. Панченко Н.А. Компьютерное моделирование пленочного охлаждения при подаче охладителя через парные отверстия / Панченко Н.А. // Вестник двигателестроения. — 2015. — №2/2015. — С. 47-51. (фахове видання України, *INSPEC*, *Index Copernicus*), ISSN 1727-0219.

#### Дисертації

11. Безлюдная М.В. Эффективность пленочного охлаждения при подаче охладителя в двухрядную систему поверхностных углублений полусферической формы: дисс. канд. техн. наук: 05.14.06: защищена 30.06.15 / Безлюдная Мария Владимировна; науч. рук. А.А. Халатов; ИТТФ НАНУ. — Киев, 2015. — 140 с.